# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ










Научная статья
УДК 621. 762. 1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-75-80

## Газотермическое напыление покрытий на алюминиевые сплавы деталей комбайна

**М. С. Егоров**, **Е. В. Фоминов**
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

***Введение.*** На современном этапе развития техники особое значение придается повышению работоспособности и долговечности деталей машин и особенно деталей узлов, работающих при повышенных нагрузках. Проблема повышения надёжности в условиях интенсификации производства, энерго- и ресурсосбережения ставит задачу внедрения в производство новых технологических процессов и применения современных материалов. Зачастую наиболее слабым элементом в системе «материал — рабочая среда», определяющим условия эксплуатации и ресурс механизмов, является поверхность материала. Поэтому важную роль в повышении его износостойкости играют покрытия, предохраняющие детали от разрушительного влияния рабочих сред.
***Постановка задачи.*** Основной задачей исследования является разработка технологических режимов нанесения газотермическим способом покрытий на ленточные шкивы комбайна TORUM 750 компании «Ростсельмаш», а также выбор оптимальных покрытий для увеличения долговечности и износостойкости поверхности шкивов.
***Теоретическая часть.*** В качестве теоретического описания проанализировано применение различных вариантов нанесения покрытий, а также рассмотрена математическая обработка экспериментальных данных по прочности сцепления между алюминиевой поверхностью и материалом покрытия.
***Выводы.*** Проведенные авторами исследования показали, что газотермическое напыление на алюминиевые сплавы ленточных покрытий целесообразно проводить на подогретую подложку (температура предварительного нагрева от 210 °C), в случае напыления покрытий на трущиеся поверхности шкивов следует регулярно охлаждать поверхности.

***Ключевые слова***: шкивы ленточные, износостойкость, напыление, алюминий, никель, титан.

***Для цитирования***: Егоров, М. С. Газотермическое напыление покрытий на алюминиевые сплавы деталей комбайна / М. С. Егоров, Е. В. Фоминов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 75–80. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-75-80

Original article

## Thermal Spraying of Coatings on Aluminum Alloys of Combine Parts

**M. S. Egorov**, **E. V. Fominov**
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

***Introduction.*** At the present stage of technology development, special importance is given to improving the efficiency and durability of machine parts and especially parts of assemblies operating under increased loads. The problem of increasing reliability in the conditions of intensification of production, energy and resource conservation poses the task of introducing new technological processes and the use of modern materials into production. Often, the weakest element in the "material — working environment" system, which determines the operating conditions and the resource of mechanisms, is the surface of the material. Therefore, an important role in increasing its wear resistance is played by coatings that protect parts from the destructive influence of working environments.

***Problem Statement.*** The main objective of the research is the development of technological modes for applying thermal coatings to the belt pulleys of the TORUM 750 combine harvester by Rostselmash, as well as the selection of optimal coatings to increase the durability and wear resistance of the pulley surface.

***Theoretical Part.*** As a theoretical description, the application of various coating options is analyzed, as well as the mathematical processing of experimental data on the adhesion strength between the aluminum surface and the coating material is considered.

***Conclusions.*** The studies carried out by the authors have shown that it is advisable to conduct thermal spraying on aluminum alloys of belt coatings on a heated substrate (preheating temperature from 210°C). In the case of spraying coatings on the rubbing surfaces of pulleys, the surfaces should be regularly cooled.

***Keywords*****:** belt pulleys, wear resistance, spraying, aluminum, nickel, titanium.

***For citation*****:** Egorov M. S., Fominov E. V. Thermal Spraying of Coatings on Aluminum Alloys of Combine Parts. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no.3, pp. 75–80. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-75-80

**Введение.** В промышленности все более широко применяются процессы, основанные на соединении материалов в твердом состоянии, различные виды сварки, а также новые технологии нанесения покрытий. Изучаемый авторами процесс нанесения покрытий газотермическим способом на алюминиевый материал имеет много общего с перечисленными выше.

Для выбора оптимальных технологических параметров, обеспечивающих необходимую прочность сцепления, чрезвычайно важно знать сущность механизма соединения исследуемых пар металлов и иметь четкое представление о взаимосвязи условий соединения разнородных материалов с физическими процессами, протекающими в зоне контакта поверхностей этих металлов. Алюминиевые сплавы имеют целый рад свойств, отличающих их от сталей и чугунов. Они обладают меньшей плотностью и относительно высокой прочностью (2,6–2,9$10^3$кг/м$^3$). Наиболее прочные сплавы служат для изготовления изделий, работающих в нагруженных условиях, при изменении изгибающих и крутящих моментов. Также алюминиевые сплавы используются в конструкциях, работающих в условиях повышенной износостойкости и при температуре до 120° С [1–3].

Указанные характеристики алюминиевых сплавов способствуют их широкому применению в качестве основных конструкционных материалов, например в автомобильной, авиационной, судостроительной промышленности [4]. Известно, что при эксплуатации поверхности детали подвергаются износу и коррозионно-эрозионному воздействию, поэтому так актуальна в настоящее время проблема повышения их износостойкости. Для этой цели следует применять газотермические износостойкие покрытия. Газотермическое напыление покрытий на алюминиевые сплавы, по сравнению с нанесением покрытий на традиционные конструкционные материалы (сталь, чугун), имеет свои особенности, вызванные большим различием коэффициентов термического расширения сплавов и покрытий.

**Целью работы** является исследование технологических режимов газотермического напыления на шкивы ленточные комбайна TORUM 750 компании «Ростсельмаш», который предназначен для уборки всех традиционных зерновых культур: колосовых, бобовых, масличных, крупяных и пропашных. Необходимо уделить большое внимание прочности сцепления покрытий с поверхностью деталей, на которые они наносятся, так как прочность сцепления материалов с алюминиевыми сплавами в несколько раз ниже, чем с остальными.

**Постановка задачи.** Для создания износостойких деталей, обладающих высокими технологическими и механическими свойствами, необходимо нанести износостойкие покрытия на рабочие поверхности изделий. В этой связи цель авторов — подобрать такие технологические режимы газотермического напыления и рекомендовать такой материал для покрытия, которые бы обеспечивали лучшее сцепление с алюминиевой основой.

**Теоретическая часть.** Способность металлических покрытий повышать долговечность и надежность деталей машин и целых агрегатов определяется их адгезией, губчатой поверхностью, сквозной пористостью и толщиной покрытия. Получение надежного сцепления покрытия с подложкой является одним из основных требований, предъявляемых к металлическим покрытиям. В работе [5] приводится информация о том, что медные и бронзовые сплавы являются одними из тех материалов, которые могут служить надежным защитным покрытием для алюминия и его сплавов из-за близких коэффициентов линейного расширения; при этом для обеспечения прочного сцепления температура частиц при взаимодействии с подложкой должна быть порядка 1200° С. Такой температуры достигали, используя напыление с окислением до 10 % $Cu_2O$, который взаимодействует с алюминиевой подложкой по экзотермической реакции:

$$2/3\ Al_{ж}+Cu_2O_{тв}=1/3\ Al_2O_3+2Cu_{тв.} \qquad (1)$$

Предложенная реакция дает в семь раз больше тепла, чем широко распространенный при создании подслоя на Al процесс экзотермической реакции Ni–Al.

Для нанесения покрытий на ленточные шкивы, изготовленные из алюминиевого сплава АК4, были применены порошковые шихты на основе никеля и титана, обладающие при плазменном напылении высокой энтальпией вследствие экзотермических реакций, что значительно повышает адгезионную прочность (рис. 1). Напыление производили с помощью оборудования компании «Ростсельмаш» и на ее территории (рис. 2).



Рис. 1. Шкивы ленточные комбайна TORUM 750 компании «Ростсельмаш»

Для обеспечения сцепления напыленного слоя с основным металлом рекомендуется осуществлять предварительную механическую зачистку поверхностей металлическими щетками и подогрев [7]. Подогрев образцов и деталей перед напылением до 210–230° С проводили в двухкамерной электрической печи с автоматическим регулированием температуры. Нагрев выше 230° С может изменять механические свойства сплава и ведет к увеличению переходного сопротивления контакта.




Рис. 2. Установка для газотермической наплавки компании «Ростсельмаш»

Имеются рекомендации осуществлять термическую активацию подложки для достижения химического взаимодействия с ней покрытия [8]. Однако предварительный подогрев подложки, выполненной из алюминиевого сплава, связан с увеличенным окислением ее поверхности и возможностью оплавления. При этом возникают значительные сжимающие напряжения в системе покрытие — подложка, вызванные резким увеличением разницы коэффициентов линейного термического расширения алюминиевого сплава и покрытия, что приводит иногда к отрицательным результатам. Чтобы снизить остаточные напряжения, которые могут превышать прочность материала покрытия, напыление следует производить на охлаждаемую подложку.

В данной работе авторы исследовали строение и состав оксидных пленок на поверхности сплава АК4, возникающих при нагреве на воздухе в процессе плазменного напыления, а также возможность применения

тлеющего разряда на стадии подготовки поверхностей деталей для финишной обработки покрытий с целью увеличения прочности сцепления последних. Установлено, что фактором, лимитирующим прочность сцепления покрытий с материалом АК4, является образование на поверхности последнего пленки оксида магния. При обработке сплава тлеющим разрядом поверхность модифицируется вследствие появления оксидов кремния, что повышает прочности сцепления покрытий в 1,3–2 раза по сравнению с традиционной струйно-абразивной обработкой. Отмечено, что «модифицированное состояние» обработанной поверхности сохраняется в течение длительного времени после извлечения деталей из вакуумной камеры, так как во всех случаях напыление покрытий производили спустя 3–4 суток после обработки поверхности шкивов тлеющим разрядом. Технологические возможности обработки тлеющим разрядом шкивов ленточных из сплава АК4 предполагают наличие сложного вакуумного оборудования, и поэтому от внедрения данной технологии в рабочий процесс компании «Ростсельмаш» пришлось отказаться.

Для подготовки поверхности ленточного шкива необходимо было провести струйно-абразивную обработку, требующую оптимального режима, который, создавая необходимую шероховатость поверхности, не вызывал бы деформации поверхности изделия [9–10]. Наличие на поверхности остатков металлической дроби отрицательно сказывается на прочности сцепления, а также на эксплуатационных свойствах шкивов, которые могут вызвать истирание клинового ремня. Экспериментальным путем был установлен следующий режим дробеструйной обработки (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальный режим дробеструйной обработки

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Давление сжатого воздуха, Па | $4 \cdot 10^5$ |
| Расстояние от сопла до поверхности, м | 0,1–0,18 |
| Время обработки, с. | 20–30 |
| Угол атаки струи дроби к поверхности, град. | 90 |

Шероховатость поверхности при этом составляла 15–20 мкм. Деформация образцов при данном режиме обработки минимальна и соответствует в среднем 40 мкм.

Чтобы удалить мельчайшие частички дроби и другие загрязнения, шкивы промывали в спиртоводной смеси (в пропорция 2:3). С целью снижения влияния разницы коэффициентов линейного термического расширения подложки и покрытия, а также релаксации остаточных напряжений, возникающих в них при напылении, применяли метод регулируемого охлаждения шкивов [10–11]. Для этого в процессе напыления с помощью термопары замеряли температуру разогрева детали. Напыленную деталь помещали в нагретую (в данном случае до 100–120° С) 0муфельную печь. Охлаждение печи производили в различных режимах (быстрое охлаждение с помощью вентилятора, охлаждение с отрытой дверцей), температурный режим нагрева и охлаждения поддерживали регулировочным потенциометром РУ5-01М. После каждого эксперимента по штифтовой методике определяли прочность сцепления покрытий с подложкой. Результаты замеров подвергали математической статистической обработке. Были вычислены средние величины ($X_{ср}$), среднеквадратичные отклонения (S) и доверительные интервалы прочности сцепления. Полученные результаты приведены в табл. 2. Оптимальная скорость снижения температуры охлаждения — 5° С/мин.

Таблица 2

Математическая статистическая обработка экспериментальных данных по прочности сцепления

| Материал покрытия | Материал подложки | $X_{ср}$ | S | Доверительный интервал |
|---|---|---|---|---|
| Никелевый сплав ПГ-Ю10-Н | В95 | 12,36 | 1,81 | $11,50<X<13,20$ |
| Титановый сплав (ПТС2) | Д16 | 24,40 | 3,70 | $22,68<X<26,16$ |
| Нержавеющая сталь ПХ18Н9Т | Д16 | 11,62 | 1,44 | $10,95<X<12,29$ |
| Титановый сплав (ПТС2) и нержавеющая сталь ПХ18Н9Т | Д16 | 22,39 | 2,12 | $21,39<X<23,38$ |

Данную методику применяли в ходе разработки газотермических покрытий для рассматриваемых шкивов. Покрытия формировали из порошков титана, никеля и нержавеющей стали российского производства компании «Полема» (г. Тула). Из исследованных порошков по ряду показателей наиболее технологичен ПТС2. Покрытие из этого порошка имеет коэффициент трения в паре с резиновым клиновидным ремнем 0,16–0,18 при удовлетворительной износостойкости. Покрытие из порошков нержавеющей стали ПХ18Н9Т обладают коэффициентом трения 0,12–0,137. Износостойкость у них удовлетворительная. Никелевый сплав показал повышенный коэффициент трения 0,21–0,23, но более зернистую структура покрытия (рис. 3).





Рис. 3. Шкивы ленточные после напыления никелевым сплавом

Нагрев образцов до 210° С снижает разницу температур между материалом подложки и самим покрытием, что приводит к увеличению времени кристаллизации напыляемых частиц, улучшает заполнение и повторяемость геометрии поверхности напыляемым слоем, уменьшает количество пор и дефектов на поверхностях (рис. 4).

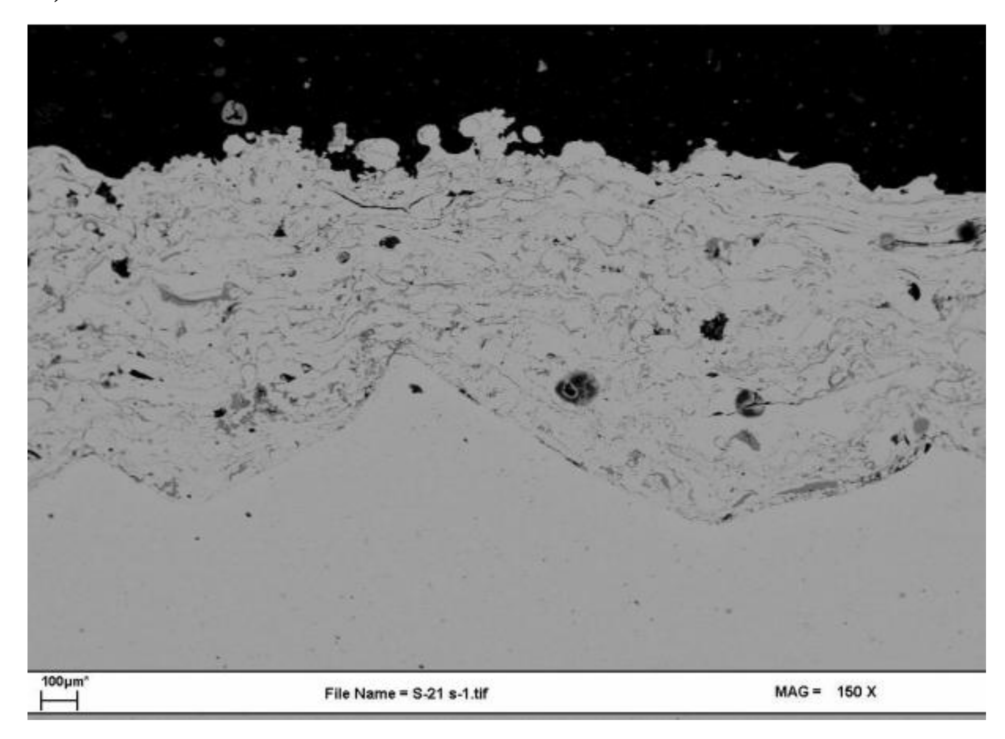



Рис. 4. Структура титанового покрытия на алюминиевую поверхность шкива

**Выводы.** Проведенные авторами исследования показали, что газотермическое напыление на алюминиевые сплавы целесообразно проводить на подогретую подложку (температура предварительного нагрева от 210° С), в случае же напыления покрытий на трущиеся поверхности шкивов следует применять режим регулярного охлаждения поверхности. После проведения операций упрочнения поверхности шкивы были установлены на комбайны TORUM 750, которые в настоящее время проходят полевые испытания.

**Библиографический список**

1. Перинский, В. В. Специальные материалы, покрытия и технологии в машиностроении : учеб. пособие / В. В. Перинский, В. Н. Лясников, Г. П. Фетисов. — Саратов : СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2012. — 740 с.

2. Восстановление деталей машин газотермическими способами : учеб. пособие / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, В. И. Ключников, К. А. Яковлев. — Воронеж : ВГЛТА, 2003. — 83 с.

3. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением / И. Н. Кравченко, В. М. Корнеев, А. А. Коломейченко, И. Е. Пупавцев // Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина. — 2015. — № 1. — С. 36–40.

4. Ковтунов, А. И. Интерметаллидные сплавы / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. — 77 с.

5. Исследование влияния условий газопламенного напыления на прочность сцепления покрытия с основным металлом / А. И. Ковтунов, Д. А. Семистенов, И. С. Нестеренко, Ю. Ю. Юриков // Сварка и диагностика. — 2018. — № 3. — С. 53–57.

6. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением / Ю. Р. Колобов, Е. Н. Каблов, Э. В. Козлов [и др.]. — Москва : Издательский дом МИСиС, 2008. — 328 с.

7. Ковтунов, А. И. Исследования процессов газопламенного напыления алюминия на сталь / А. И. Ковтунов, И. С. Нестеренко // Современные концепции развития науки : мат-ы междунар. науч.-практ. конф. — Пермь, 2018. — С. 58–63.

8. Способ подготовки поверхности изделия под напыление : патент 2004350 Рос. Федерация : B05D 3/12 / С. В. Храменков, В. П. Кычин, В. И. Бабинец, В. П. Фомушкин ; заявитель и патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. — № 2003119672/12 ; заявл. 30.06.2003 ; опубл. 10.10.2004. — 4 с.

9. Working hypothesis for origin of anisotropic sintering shrinkage caused by prior uniaxial cold compaction / A. Molinari, C. Menapace, E. Torresani [et al.] // Powder Metallurgy. — 2013. — Vol. 56, iss. 3. — P. 189–195.

10. Упрочнение быстроизнашивающихся поверхностей безвольфрамовыми твердыми сплавами и карбидсодержащими сталями / В. А. Маслюк, Г. А. Баглюк, С. Г. Напара-Волгина, Р. В. Яковенко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2007. — № 1. — С 42–47.

11. Лясников, В. Н. Плазменное напыление : монография / В. Н. Лясников, А. В. Лясникова, О. А. Дударева. — Саратов : СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2016. — 620 с.

Поступила в редакцию 10.06.2022
Поступила после рецензирования 19.07.2022
Принята к публикации 19.07.2022

*Об авторах:*

**Егоров Максим Сергеевич,** заведующий кафедрой «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, aquavdonsk@mail.ru

**Фоминов Евгений Валерьевич,** доцент кафедры «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, f972@yandex.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

М. С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Е. В. Фоминов — проведение расчетов, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.